

基于连续积分法分析高速铁路与中低速磁浮 线路交叉跨越对信号电缆的影响^{*}

李天石¹ 龚孟荣² 张晨¹ 黄辉² 苏立轩¹ 霍斌¹ 王利平¹

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 100081, 北京;

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//第一作者, 副研究员)

摘要 采用连续积分法替代分段法计算了高速铁路与中低速磁浮线路交叉跨越时供电线路与信号线缆之间的互感系数;采用由实测空间磁场值导出等效施扰电流的反推法,确定了复杂供电网络的等效施扰电流。计算了各种交叉跨越条件下高速铁路牵引供电系统对中低速磁浮信号电缆,以及中低速磁浮牵引供电系统对铁路信号电缆的纵向感应电动势。以长沙中低速磁浮线路与沪昆高速铁路交叉跨越为实际案例进行计算,并与现场实测结果进行了比较分析,发现计算结果和实测结果有较好的符合性。该结果验证了影响分析计算方法的准确性。

关键词 中低速磁浮; 高速铁路; 信号电缆; 感应电动势

中图分类号 U284.93; U237; U238

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.024

Influence of High-speed Railway and Low-medium Speed Maglev Line Intercrossing on Signal Cable Based on Continuous Integral Method

LI Tianshi, GONG Mengrong, ZHANG Chen, HUANG Hui, SU Lixuan, HUO Bin, WANG Liping

Abstract The mutual induction coefficient between power supply line and signal cable when high-speed railway and low-medium speed maglev line intercross is calculated by continuous integral method instead of segmentation method. By reverse derivation of obtaining equivalent disturbing current from site-measured space magnetic field value, the equivalent disturbing current of complex power supply network is determined. The longitudinal induced electromotive force from high-speed railway traction power supply system to low-medium speed maglev signal cables, and that from low-medium speed maglev traction power supply system to railway signal cables under various intercrossing conditions are calculated. Taking the practical case of Changsha low-medium speed maglev line and

Shanghai-Kunming High-speed Railway intercrossing for calculation, the comparative analysis of calculation and site-measured results demonstrate good agreement. The result verifies the accuracy of the influence analysis calculation method.

Key words low-medium speed maglev; high-speed railway; signal cable; induced electromotive force

First-author's address Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., 100081, Beijing, China

随着中低速磁浮线路的建设发展,多地出现铁路与中低速磁浮线路并行或交叉跨越的情况。例如,建设中的广州清远中低速磁浮线路4次交越铁路(含高速铁路)。这两种交通方式并行和交越时对各信号系统的电磁影响尚未可知,由此引发了一定的关注与担忧。本文构建了典型的交越计算模型,针对高速铁路与中低速磁浮线路平行与交叉跨越时信号电缆所受电磁影响,进行了理论计算分析和实测试验验证。

我国电气化铁路对电信线路磁影响互感系数的计算一般采用波拉切克和卡尔生公式^[1-2]。对斜接近段和交越段互感系数的计算一般采用分段法^[1]。即先分段,再根据1973年CCITT(国际电报电话咨询委员会)发布的《防止电力线路对电信线路危害影响的保护导则》相应表格,求得各段互感系数,最后计算各段感应电动势的和。分段法不仅计算过程繁琐,而且近似误差较大。高速铁路与中低速磁浮线路的牵引供电系统均由多条线缆组成,计算此类强电系统对电信线路的影响时,一般先在其几何位置中点确定1条等效施扰导线,再通过计算确定其上施扰电流的方法。这种方法也存在计

^{*} 中国铁建股份有限公司科技重大专项资助计划项目(2018-A01)

算复杂、误差较大的问题。

CCITT 曾推荐哈伯尔兰提出的斜接近段和交越段互感系数连续积分计算公式^[1-3]。目前我国的铁路防干扰专业未见相关应用。本文采用该法进行计算,根据线路旁实测磁感应强度反推出等效施扰导线上的施扰电流,综合了强电系统全部导线上电流的作用,改进了分段法的不足,所得结果更符合实际,且更能满足研究需要。

1 电磁影响的计算及参数

1.1 基本感应电动势的计算

当电信线缆与强电线路接近时,电信线缆上感应的纵向电动势 E 为^[1]:

$$E = 2\pi f I_k L_p P_r P_e M \quad (1)$$

式中:

f ——强电线施扰电流频率;

I_k ——强电线施扰电流;

L_p ——电信线缆与强电线之间的接近长度,为电信线缆在强电线上的投影;

P_r ——铁路钢轨屏蔽系数,对于电气化铁路和磁浮线路, $P_r = 1$;

P_e ——电信线缆外皮的屏蔽系数;对于一般铠装铝护套电缆,如电缆外皮双端接地, $f = 50 \text{ Hz}$, $P_e = 0.2$ ^[1];如外皮单端接地、无屏蔽效果, $P_e = 1$;

M ——电信线缆与强电线路间的互感系数,可根据 f 、大地导电率 σ ,以及电信线缆与强电线之间的接近距离 a 计算或查表^[1]得出。

1.2 M 的计算

1.2.1 以往工程设计采用的方法

在频率和大地导电率确定的情况下, a 决定了 M 的大小。电信线缆与强电线路的接近状态有平行接近、斜接近和交越接近。

如电信线缆与强电线路接近,其始端与强电线路的接近距离为 a_1 ,终端与强电线路的接近距离为 a_2 ,且 $a_2 > a_1$,其算术平均值 $a_0 = (a_1 + a_2)/2$ 。当 $(a_2 - a_1)/a_0 \leq 3\%$ 时,电信线缆与强电线路为平行接近。

斜接近应满足 $a_2/a_1 \leq 3$,斜接近的接近距离可用等效距离 $a = \sqrt{a_1 a_2}$ 来替代。如不满足 $a_2/a_1 \leq 3$,则需再分段,并使每一小段满足要求。

当交越角 $\alpha > 45^\circ$ 时,交越接近段的影响可忽略。交越接近段长度为交越点两侧电信线缆距离强电线路垂直距离 50 m 的两点之间距离;当 $\alpha \leq$

45° 时,交越接近段长度为交越点两侧电信线缆距离强电线路 10 m 的两点之间的距离。该交越接近段影响均按 $a = 6 \text{ m}$ 的平行接近段计算。

1.2.2 连续积分法

为了研究中低速磁浮线路与铁路交叉跨越时相互之间是否存在对信号电缆的电磁影响及这种影响有多大,交越接近段更是关注的重点。在电磁影响分析中, M 的分段法有明显不足:①误差较大,当交越角 $\alpha > 45^\circ$ 时交越接近段影响被忽略,当 $\alpha \leq 45^\circ$ 时交越接近段影响均按 $a = 6 \text{ m}$ 的平行接近段计算。②从平行接近、斜接近、到交越接近段, a 的取值缺乏连续性。③斜接近段需按 $a_2/a_1 \leq 3$ 分成若干段计算,每段 a 不同、 M 也不同,计算较繁琐。基于以上原因,本文采用更为适用斜接近段和交越接近段的连续积分法近似计算^[1]:

$$|M| = \ln(1 + k^2/a^2) \times 10^{-7} \quad (2)$$

$$k^2 = 6 \times 10^6 (\sigma f)$$

其中: k 为系数; σ 为大地电导率, S/m ; a 单位为 m ; M 单位为 H/m 。

为便于计算,设中间变量函数 $G(a) = a \ln(1 + k^2/a^2) - 2 \arctan(k/a)$ 。当 $a_2 > a_1$ 时,对式(1)一式(2)进行积分,则可得斜接近段的平均互感系数 M_a :

$$M_a = 10^{-7} [G(a_2) - G(a_1)] / (a_2 - a_1) \quad (3)$$

由式(1)一式(3),可以计算出强弱电线路之间不同 α 、不同高差对应的 M_a ,便于得出 E 随各参数连续变化的规律。

1.3 I_k 的计算

高速铁路采用的电气化铁路接触网由上下行接触导线、正馈线和架空回流线等组成。中低速磁浮供电线路由上下行供电线缆和馈送与回流接触轨组成。可见,强电线路结构较复杂,仅靠设等效施扰导线的算法复杂且准确性低。对此,本文引入等效施扰导线和等效施扰电流的概念:用 1 根流过等效施扰电流 I_k 的等效施扰导线替代 1 组强电线,则在距等效施扰导线一定距离的观测点,会产生与被替代的 1 组强电线相同的感应效果。根据安培环路定律,采用反推的方法即可获取 I_k 。具体方法如下:

采用低频磁场测量仪,探头距地面高度为 1.5 m,测量距电气化铁路或距磁浮线路外轨中心线一定距离处的低频磁感应强度 B ,并记录 $f = 50 \text{ Hz}$ 时的低频磁感应强度最大值。则强电线路等效施扰

导线电流应满足:

$$B = \frac{\mu_0 I_k}{2\pi R} \quad (4)$$

式中:

R ——等效施扰导线距轨旁磁感应强度测点距离;

I_k ——等效施扰导线电流;

μ_0 ——真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$;

由式(4)可推算出 I_k 。

1.4 导线与电缆位置

1) 等效施扰导线位置。对于复线电气化铁路,接触网的等效施扰导线平行于铁路,其轨面以上垂直高度取值见图1,水平位置取复线中心;对于中低速磁浮线路,等效施扰导线也平行于平行线路,其高度与供电导轨轨面高度相同,水平位置取复线中心。

2) 磁浮与铁路信号电缆位置。磁浮信号电缆平行于磁浮线路,高度取磁浮导电轨高度,水平位置中心与磁浮复线中心重合。铁路信号电缆平行于铁路线路,高度近似取轨面高度,水平位置在边轨中心线外侧约1.8 m。

强电线路等效施扰导线和被影响导线的几何位置确定后, R 与 a 便可随之确定。

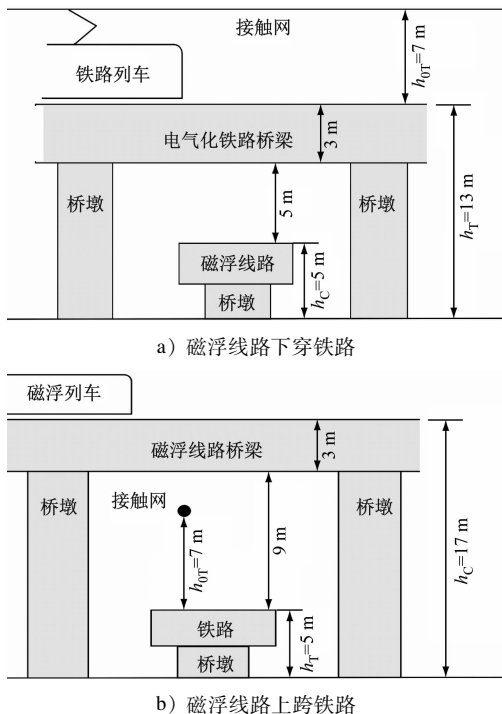
2 典型交越条件下的影响计算

2.1 典型交越条件的设定

典型交越中,磁浮线路下穿和上跨铁路的位置关系见图1。为便于比较,需统一设定典型交越条件下各种交越情况的部分参数:① 铁路或磁浮信号电缆长度 $L = 1000 \text{ m}$;② 磁浮线路与铁路交越点位于信号电缆中间点;③ $\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$;④ $\sigma = 0.1 \text{ S/m}$;⑤ 计算频率为强电线频率, $f = 50 \text{ Hz}$;⑥ 铁路信号电缆 $P_c = 1.0$,磁浮信号电缆 $P_c = 0.2$;⑦ 根据高速铁路线路和中低速磁浮线路在列车通过时 B 的实测值,计算出 I_k 。

经比较,高速铁路线路的 B 采用列车速度达 300 km/h 以上的京沪(北京—上海)高速铁路实测数据。高铁磁场测点距线路外轨中心线水平投影 $d_x = 20 \text{ m}$,桥高(轨面至地面高度) $h_T = 10 \text{ m}$,可推出接触网等效施扰导线与地面测点的距离 $R = 28.2 \text{ m}$ 。实测京沪高铁列车通过时 $f = 50 \text{ Hz}$,磁感应强度 $B = 1.501 \text{ } \mu\text{T}$,由式(4)可推出铁路接触网等效施扰导线上的 $I_k = 211.64 \text{ A}$ 。

中低速磁浮线路的 B 采用长沙中低速磁浮线路实测数据。长沙磁浮线测点距外轨中心线水平投影 $d_x = 15 \text{ m}$,桥高(导电轨至地面高度) $h_C = 5 \text{ m}$,可推出 $R = 17.9 \text{ m}$ 。实测磁浮列车通过时 $f = 50 \text{ Hz}$, $B = 0.022057 \text{ } \mu\text{T}$,由式(4)可推出 $I_k = 1.975 \text{ A}$ 。



注: h_C 为磁浮线路供电轨轨面对地面高度,与磁浮线路信号电缆距地面高度近似相同; h_T 为电气化铁路轨面对地面高度,与电气化铁路信号电缆距地面高度近似相同; h_{0T} 为电气化铁路接触网等效施扰导线距轨面高度,取 7 m 。

图1 磁浮线路与铁路相对位置图

Fig.1 Relative position diagram of maglev line and railway

2.2 典型交越条件下的 E

由图1,可分以下4种情况计算信号电缆上某点的 a 值:

情况1 磁浮线路下穿铁路,磁浮线路信号电缆受铁路接触网的影响。设磁浮线路信号电缆某点在铁路等效施扰导线上水平投影距离为 d_T ,则该点 a 为:

$$a = \sqrt{d_T^2 + (h_T - h_C + h_{0T})^2} \quad (5)$$

情况2 磁浮线路下穿铁路,铁路信号电缆受磁浮线路供电线路的影响。设电气化铁路信号电缆某点在磁浮等效施扰导线上水平投影距离为 d_C ,则该点 a 为:

$$a = \sqrt{d_C^2 + (h_T - h_C)^2} \quad (6)$$

情况 3 磁浮线路上跨铁路,磁浮线路信号电缆受铁路接触网的影响。此情况下 a 为:

$$a = \sqrt{d_T^2 + (h_C - h_T - h_{0T})^2} \tag{7}$$

情况 4 磁浮线路上跨铁路,铁路信号电缆受磁浮线路供电线路的影响。此情况下 a 为:

$$a = \sqrt{d_C^2 + (h_C - h_T)^2} \tag{8}$$

将由式(5)–(8)得到的 a 和其他设定参数代入式(1)–(3),计算 E ,结果见图 2。

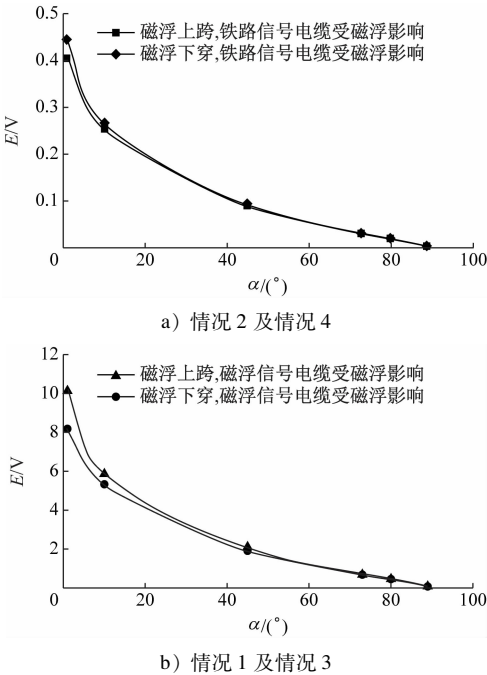


图 2 磁浮和铁路信号电缆受强电影响产生的 50 Hz 感应电动势

Fig. 2 50 Hz induced electromotive force in signal cables of maglev and railway caused by strong current

由图 2 可知:① 信号电缆上的 E 随着 α 的增大而变小。 $\alpha = 0^{\circ}$ 时,两线为平行接近, E 达到最大; $\alpha = 90^{\circ}$ 时,两线为垂直交越, $E = 0$ 。② 磁浮线路信号电缆受铁路接触网的影响要明显大于铁路信号电缆受磁浮线路供电线路的影响,主要原因在于铁路 50 Hz 时的 I_k (为 211.64 A) 明显大于磁浮线路 50 Hz 时的 I_k (1.98 A)。③ 由于供电线缆与信号线缆之间距离不同,对于磁浮信号电缆受铁路接触网的影响,磁浮上跨铁路的影响要大于其下穿铁路的影响;对于铁路信号电缆受磁浮线路供电线路的影响,磁浮线路下穿铁路的影响要大于其上跨铁路的影响。

2.3 典型条件下 σ 变化对计算结果的影响

本文以情况 3 为例,计算不同 σ 条件下的磁浮

线路 LEU (地面电子单元) 信号电缆的 E 值。计算结果表明, σ 越小, E 越大。如果 LEU 信号电缆按最长为 3 500 m 考虑,当 $\alpha \approx 0^{\circ}$ 时,在 σ 分别为 0.1 S/m、0.01 S/m 和 0.001 S/m 时, E 分别达到 39.5 V、50.2 V 和 60.9 V,已接近或超过 GB 6830—1986 《电信线路遭受强电路危险影响的允许值》中正常条件下 $E \leq 60$ V 的规定。

3 实例计算结果与实测结果的比较

3.1 计算结果

长沙磁浮线与沪昆 (上海—昆明) 高速铁路交越点位于长沙磁浮线榔梨站北侧 300 m 处, $\alpha = 73^{\circ}$ 。跨交越点的磁浮线路 LEU 信号电缆长 552 m,榔梨站距交越点 300 m;交越点至磁浮线路上应答器终端长度为 252 m。该信号电缆在铁路线上的投影即为强弱电导线的接近长度 L_p 。采用本文方法进行计算,当长沙磁浮线下穿沪昆高速铁路时,磁浮线路 LEU 信号电缆受高速铁路影响, $E = 174.3$ mV。由于磁浮 LEU 信号电缆较短, α 较大,故计算得出的 E 较小。

3.2 实测结果与计算结果

在距两线交越点最近的榔梨站信号机房 (即计算测点处),实地测量了磁浮线路的 LEU 信号电缆受沪昆高速铁路过车影响产生的、较为稳定的、50 Hz 情况下的 E 值。测量结果见表 1。

表 1 沪昆高铁列车通过交越点时磁浮 LEU 电缆 50 Hz 感应电动势实测值与计算值比较

| Tab. 1 Comparison between measured value and calculation value of maglev LEU cable 50 Hz induced electromotive force with Shanghai-Kunming High-speed Railway passing the intercrossing point | | | |
|---|------------|------------|------|
| 测试序号 | E 实测值/mV | E 计算值/mV | 误差/% |
| 1 | 166.4 | 174.3 | 4.5 |
| 2 | 151.8 | 174.3 | 12.9 |

注:误差 = (计算值 - 实测值) / 实测值 $\times 100\%$ 。

由表 1 可见, E 的实测值与计算值有较好的符合性。计算值略大于实测值,这与计算时某些参数取值存在误差有关。

4 结论

1) 信号电缆上 50 Hz 时的 E 随着 α 增大而变小。 $\alpha = 0^{\circ}$ 为平行接近, E 最大; $\alpha = 90^{\circ}$ 为垂直交越, $E = 0$ 。

2) 铁路 50 Hz 时的 I_k 明显大于磁浮 50 Hz 时的 I_k 。磁浮线路信号电缆受铁路接触网的影响要明显大于铁路信号电缆受磁浮线路供电线路的影响。在强、弱电导线接近平行时($\alpha=1^\circ$),前者 E 最大值为 10.23 V;后者 E 最大值仅为 0.44 V。

3) 对于铁路信号电缆受磁浮线路供电线路影响,磁浮线路下穿铁路时的影响要大于其上跨铁路时的影响;对于磁浮信号电缆受铁路接触网的影响,磁浮上跨铁路时的影响要大于其下穿铁路时的影响。在各交越条件中,磁浮线路上跨铁路是其信号电缆受影响最大的一种交越模式,此时的磁浮信号电缆距铁路接触网距离最近。

4) 在较严酷的条件下,即 $\alpha \approx 0^\circ$ 时, σ 很小,如磁浮线路上跨铁路,受铁路过车影响,则磁浮信号电缆的 E 有可能接近甚至超过 GB 6830—1986 中正常条件下的规定值。

5) 由长沙磁浮线与沪昆高速铁路交越处的实际 α 、 L_p 和 I_k , 计算得到的磁浮信号电缆 E 值与实测值基本吻合,验证了本文所采用的计算方法是可行的。

(上接第 132 页)

- [2] 王生华. 上海地铁 4 号线车轮轮缘异常磨损原因分析及解决措施[J]. 铁道车辆, 2007(6): 32.
WANG Shenghua. Analysis of causes to abnormal wear of wheel flanges for Shanghai Metro No. 4 Line and measures for solution [J]. Rolling Stock, 2007(6): 32.
- [3] 邱伟明, 朱永波. 广州地铁三号线车辆轮缘异常磨损原因分析及解决措施[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011(4): 80.
QIU Weiming, ZHU Yongbo. Analysis of causes of abnormal wheel flange wear of Guangzhou Metro Line 3 vehicles and solutions [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2011(4): 80.
- [4] 张春森, 吴蓉蓉, 李国君, 等. 面向对象的高空间分辨率遥感影像箱线图变化检测方法[J]. 国土资源遥感, 2020(2): 19.
ZHANG Chunsen, WU Rongrong, LI Guojun, et al. High resolution remote sensing image object change detection based on box-plot method [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020(2): 19.

5 建议

根据计算结果及实测情况, 工程设计中宜避免磁浮上跨铁路方案, 尽量采用铁路上跨磁浮线路的方案; 应尽可能增大磁浮线路和铁路的交越角; 两者平行接近时, 应尽量增大接近距离, 减少接近长度; 磁浮信号电缆外皮应双端接地。

参考文献

- [1] 马其祥, 黄炎, 赵国谦. 强电线路的电磁影响与防护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
MA Qixiang, HUANG Yan, ZHAO Guoqian. Electromagnet affect and protection of heavy current line [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989.
- [2] 高攸纲. 感性耦合与阻性耦合[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1979.
GAO Yougang. Inductive coupling and impedance coupling [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1979.
- [3] 倪海云. 无限长导线互感系数计算公式分析[J]. 电力建设, 1996(5): 15.
NI Haiyun. Analysis of calculation formula of mutual inductance coefficient of infinite conductor [J]. Electric Power Construction, 1996(5): 15.

(收稿日期: 2020-08-13)

- [5] 冯嘉琛, 蔡江辉, 杨海峰. 一种改进隔离森林的快速离群点检测算法[J]. 小型微型计算机系统, 2019(11): 2418.
FENG Jiachen, CAI Jianghui, YANG Haifeng. Fast outlier detection algorithm based on isolation forest [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019(11): 2418.
- [6] TURKEY J W. Exploratory data analysis [M]. London: Pearson, 1977.
- [7] LIU F T, TING K M, ZHOU Z H. Isolation forest [C]// Proceedings of the Eighth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM). Pisa: IEEE, 2008: 413.

(收稿日期: 2021-11-06)

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题, 以及新技术、新成果, 邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述, 是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

